

Análisis del comportamiento estructural de la basílica del Pilar de Zaragoza

Luis E. Romera, Santiago Hernández y José Manuel Reinosá

Grupo de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos (ETSICCP), UDC
Campus de Elviña, 15071 La Coruña, España
Tel.: 34-981 16 70 00; Fax: 34-981 16 71 70
e-mail: lromera@udc.es, web <http://caminos.udc.es/grupos/mmcte>

Resumen

En el artículo se presentan los trabajos de desarrollo y validación de un conjunto de modelos estructurales de la basílica del Pilar de Zaragoza planteados con el objetivo de aproximar el estado estructural actual del templo y su nivel de seguridad. Los modelos numéricos se han formulado aplicando el MEF en teoría lineal y no lineal, incluyendo el proceso constructivo y las obras de refuerzo aplicadas a la estructura a lo largo de su historia. Dentro de las no linealidades se considera el comportamiento no lineal de la fábrica de ladrillo mediante modelos con rotura a baja tracción y plastificación en compresión.

Palabras clave:

estructuras históricas, fábrica de ladrillo, simulación numérica, elementos finitos, material no lineal.

STRUCTURAL ANALYSIS OF THE BASILICA OF PILAR IN ZARAGOZA

Summary

In this paper a work devoted to elaborate and validate a set of structural models of the Basilica of Pilar in Zaragoza (Spain) is presented. The main aim of the research was to identify the present strength of the church and its safety level. All structural models have been worked out by finite element techniques using lineal and nonlinear theories, also the actual construction procedures and the additional structural components added to the temple along its history have been included. Material nonlinearity has been simulated considering an upper tensile stress level and the consequent plastic behaviour.

Keywords:

historical buildings, masonry, structural models, finite element analysis, nonlinear material.

INTRODUCCIÓN

El Pilar es un templo extenso con un esquema arquitectónico complejo y una construcción en el tiempo larga y accidentada. La obra¹ se inicia a finales del siglo XVII sobre las iglesias románica y gótica previas, edificándose la cúpula central a mediados del siglo XIX y los cuerpos superiores de las torres de la fachada al río Ebro en 1940. El edificio (Figura 1) consta de un recinto principal rectangular con tres naves longitudinales. La nave central alberga la cúpula principal de doble hoja y planta circular y otras dos de planta elíptica. Las naves laterales alojan ocho cúpulas de revolución. Rodeando perimetralmente al recinto se sitúan un conjunto de capillas y cuatro torres situadas en las esquinas con más de 90 m de altura.

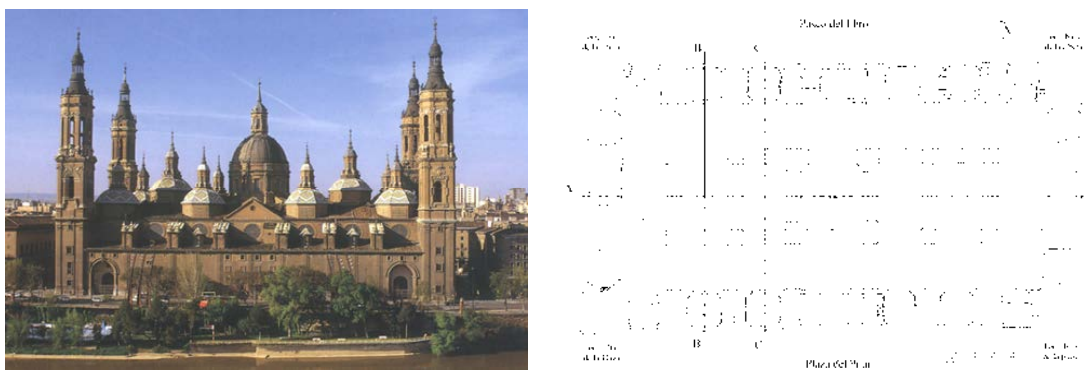


Figura 1. Basílica del Pilar y planta con la disposición de muros, pilares, arcos, bóvedas y cúpulas

La cúpula Regina Martirum es una de las ocho cúpulas de revolución existentes en la basílica. Alberga un conjunto pictórico de frescos cuya autoría corresponde a Francisco de Goya, observándose en la actualidad una discontinuidad de unos 4 cm en el arranque de la cúpula y a lo largo de un tercio de un meridiano; a ello cabe añadir la aparición de humedades, pérdidas de material y pequeñas fisuras en los últimos años (Figura 2).

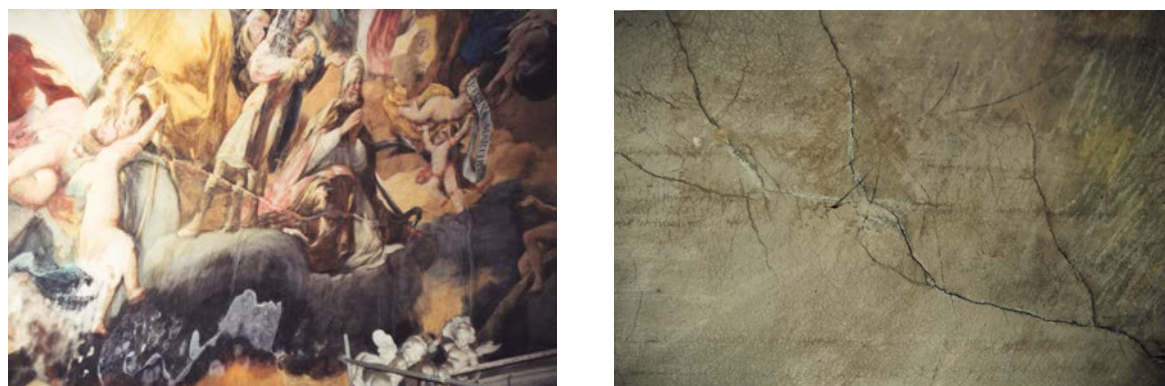


Figura 2. Detalle de los frescos de la cúpula Regina Martirum (izda) y fisuras en el paramento (dcha)

Además del problema anterior existen en el templo otras zonas donde se han manifestado anomalías en el comportamiento resistente como, la aparición de humedades, grietas y cierto deterioro de la fábrica, en especial en las torres situadas en la fachada sur del templo.

Con el fin de determinar si la causa del deterioro de los frescos y el resto de patologías puede atribuirse a problemas estructurales, y en su caso plantear las actuaciones necesarias para corregirlos, se está realizando un estudio numérico en el que se han desarrollado diversos modelos de elementos finitos para simular el comportamiento estructural global del templo y el local de la cúpula Regina Martirum.

La metodología planteada en el trabajo^{2,3} sigue el diagrama de flujo de la Figura 3. Debido a la complejidad geométrica del templo y su gran extensión se planteó como primera tarea la realización de un modelo geométrico digital 3D a partir de los planos existentes y de mediciones directas, que sirviera posteriormente como base geométrica de los modelos estructurales. En la realización del modelo geométrico (Figura 4) se partió de la premisa de que la información debía ser lo más precisa y completa posible, evitando cualquier simplificación que alterase las formas importantes de la construcción y eliminando sólo los aspectos irrelevantes estructuralmente. A partir del modelo geométrico se generó un modelo de visualización y los distintos modelos estructurales.

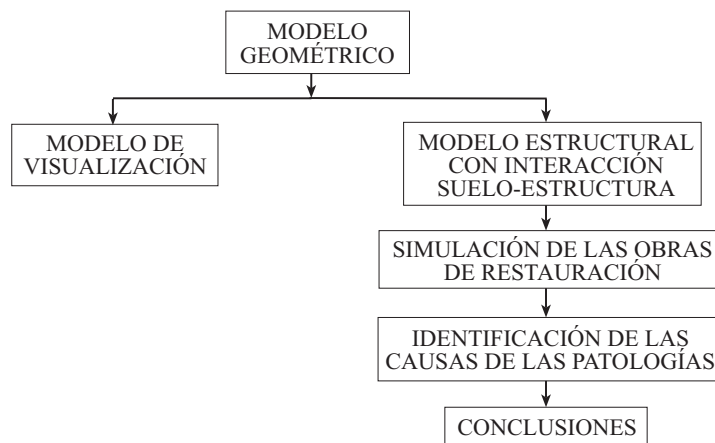


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología

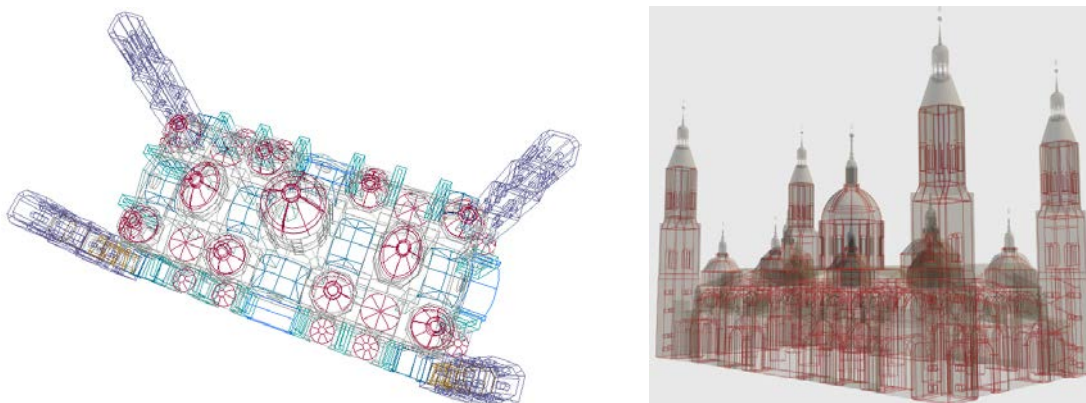


Figura 4. Modelos geométrico y de visualización

Debido a la importancia de las obras ejecutadas desde 1927 a 1940, que consiguieron evitar la ruina del templo, se decidió realizar un primer modelo, en el que se reflejase el estado de la construcción previo a las citadas reformas. La comparación de los resultados obtenidos en este modelo con las descripciones históricas disponibles de las patologías que obligaron a realizarlas ha permitido comprobar la validez de las hipótesis consideradas en el modelo de la estructura y de sus cargas. Tras verificar el modelo de 1930 se realizaron las modificaciones necesarias para simular las obras de reparación generándose un nuevo modelo correspondiente al estado actual de la estructura.

Las obras de reparación (Figura 5) consistieron fundamentalmente en:

- refuerzo del armado de cimentación y construcción de un sistema de vigas de atado,
- inyecciones masivas de mortero de cemento en el terreno,
- apeo y posterior refuerzo mediante camisas de perfiles metálicos de pilares y arcos,
- zunchado de los tambores de las cúpulas elípticas,
- construcción de arcos de descarga de los tambores de mayores dimensiones.

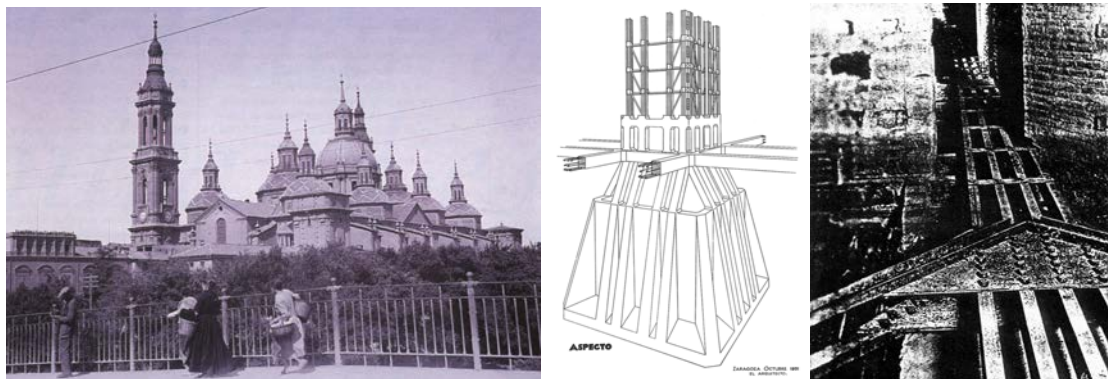


Figura 5. La Basílica en 1930, refuerzos de pilastras, cimentación y tirantes de zunchado en tambores

MODELOS ESTRUCTURALES

Los modelos de elementos finitos del templo desarrollados son de dos tipos: globales y locales para la cúpula Regina Martirum. Para ello se han utilizado los códigos comerciales COSMOS/M v.2.8^{4,5} y MSC.MARC 2003⁶. En ellos se combinan elementos sólidos hexaédricos y tetraédricos utilizados en pilares, arcos, tambores y muros, con elementos barra y láminas cuadrangulares y triangulares en las cúpulas, forjados, muros de cerramiento y estructuras de refuerzo.

Los únicos elementos del templo no incluidos debido a su nula función resistente son el sistema de cubiertas y los chapiteles de remate de cúpulas y torres. Estos últimos arrancan de la viga de borde de la cúpula que sí se ha incluido en el modelo.

En cada modelo se ha realizado una primera versión con elementos sólidos lineales y elementos lámina cuadrangulares de 4 nudos y triangulares de 3 nudos y otra versión posterior con sólidos cuadráticos y láminas de 6 ó 9 nudos. En el modelo más refinado la malla está formada por 82 000 elementos y 140 000 nudos.

En la Figura 6 aparece el modelo correspondiente a 1930, con dos torres sin finalizar y en el que se incluye el terreno, y en la Figura 7 se presenta el modelo correspondiente al estado actual del templo, con las obras de refuerzo incluidas, junto con un detalle de la malla.

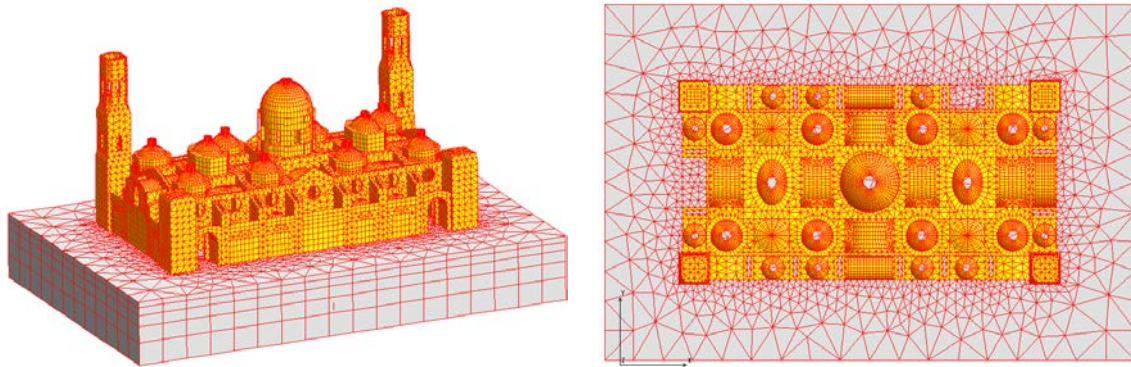


Figura 6. Modelo de 1930, vista tridimensional y planta

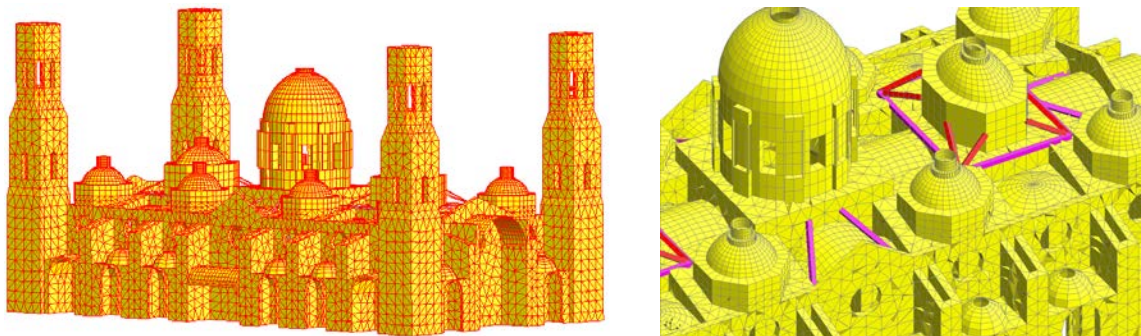


Figura 7. Modelo del estado actual y detalle de la malla

En el modelo que refleja la situación actual del templo todas las actuaciones de refuerzo se han incorporado mediante elementos lámina y barra. En el caso del terreno se comprobó que el análisis con unas propiedades mejoradas y la inclusión del sistema de atado conducía a unos resultados muy similares a los obtenidos considerando la base del templo empotrada, por lo que se adoptó esta última solución eliminándose el terreno del modelo del estado actual.

Cargas consideradas

Las cargas consideradas han sido:

- peso propio de la estructura,
- peso muerto de cubiertas de cúpulas y chapiteles,
- carga térmica uniforme $\Delta T = \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ en toda la estructura,
- gradiente térmico debido a una diferencia de temperaturas en la cúpula Regina Martirum de $\Delta T = \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ entre el interior y el exterior.

Caracterización del material

En los modelos lineales se ha considerado la fábrica de ladrillo^{7,8}, el terreno y los refuerzos metálicos y de hormigón como materiales isotrópicos y lineales con las propiedades que aparecen reflejadas en la Tabla I. En el caso del modelo de 1930 se han realizado dos hipótesis distintas en el terreno ante la posibilidad de que el suelo sedimentario próximo a la ribera, previamente a las obras de consolidación, se hubiera deteriorado considerablemente.

Respecto a los pilares del templo se han considerado macizos en los modelos, pero por sus grandes dimensiones se ha planteado la posibilidad de que tengan un núcleo interior de relleno, cuyo efecto se ha recogido usando un módulo de elasticidad reducido.

	E (KPa)	ν	γ (KN/m ³)
Ladrillo	$4,5 \cdot 10^6$	0,1	17,66
Terreno 1	$2,5 \cdot 10^6$	0,3	–
Terreno 2	$2,5 \cdot 10^5$	0,3	–
Pilares con relleno	$2,25 \cdot 10^6$	0,1	17,66
Hormigón	$3 \cdot 10^7$	0,2	23,54
Acero	$2,1 \cdot 10^8$	0,3	77

Tabla I. Propiedades de los materiales

Tras los análisis lineales se han realizado cálculos no lineales (Figura 8), en los que se modela la fábrica de ladrillo como un material isotrópico, con un comportamiento de rotura frágil a tracción y lineal en compresión (modelo 1), o incorporando además la posibilidad de plastificación en compresión (modelo 2) mediante un modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb lineal.

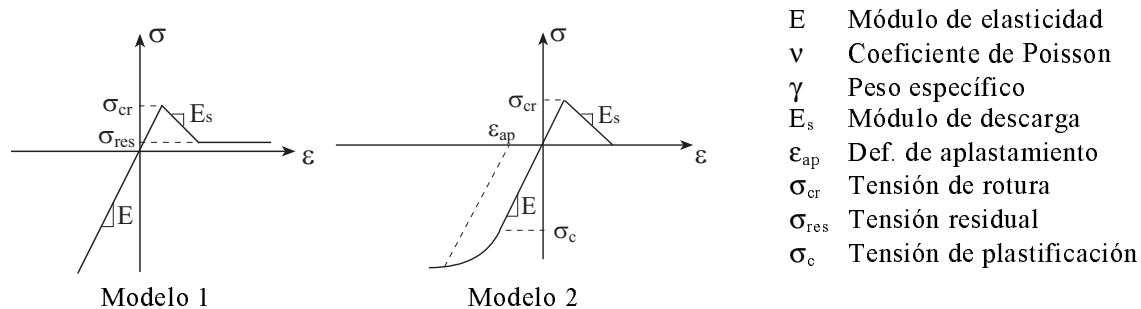


Figura 8. Modelos de material no lineal

El modelo 1 de material se ha programado en el código Cosmos/m, aplicándolo en el análisis del modelo global a los elementos de tipo sólido. Está basado en un modelo del tipo “smear-crack”⁹, en el que en cada punto de Gauss se evalúa la posibilidad de formación de una grieta perpendicular a la tracción principal máxima. Una vez que se forma la grieta su dirección es fija, es decir, no se considera la posibilidad de rotación de las fisuras abiertas al aumentar los niveles de carga.

El modelo 2 del material se ha aplicado en el análisis local de la cúpula Regina Martirum mediante el código de análisis no lineal de elementos finitos MSC. Marc.

Respecto a los parámetros utilizados en ambos modelos en el trabajo que se presenta se ha utilizado un rango de valores típicos de la bibliografía existente sobre estructuras históricas de fábrica de ladrillo^{10,11}, estudiándose la sensibilidad ante los distintos parámetros de los resultados obtenidos. En los resultados que se presentan en el apartado siguiente se indican los valores utilizados.

Debido al tipo de construcción, a su gran envergadura y a la dilatada extensión temporal de las obras se ha planteado la necesidad de realizar una futura campaña de ensayos que permita determinar de forma precisa las características mecánicas de las fábricas y su distribución espacial. También se ha planteado la necesidad de instalar la instrumentación necesaria para medir movimientos y apertura de fisuras durante un cierto periodo, en especial, en la cúpula Regina Martirum.

RESULTADOS

Se presentan en primer lugar los resultados del modelo de 1930 y posteriormente los resultados del modelo actual.

Modelo de 1930

Considerando material lineal y un terreno uniforme del tipo 1, las tensiones principales de tracción y compresión alcanzan valores máximos de 900 KPa y 2400 KPa, respectivamente (Figura 9). Estos valores superan ampliamente los límites de resistencia a tracción y compresión de la fábrica de ladrillo.

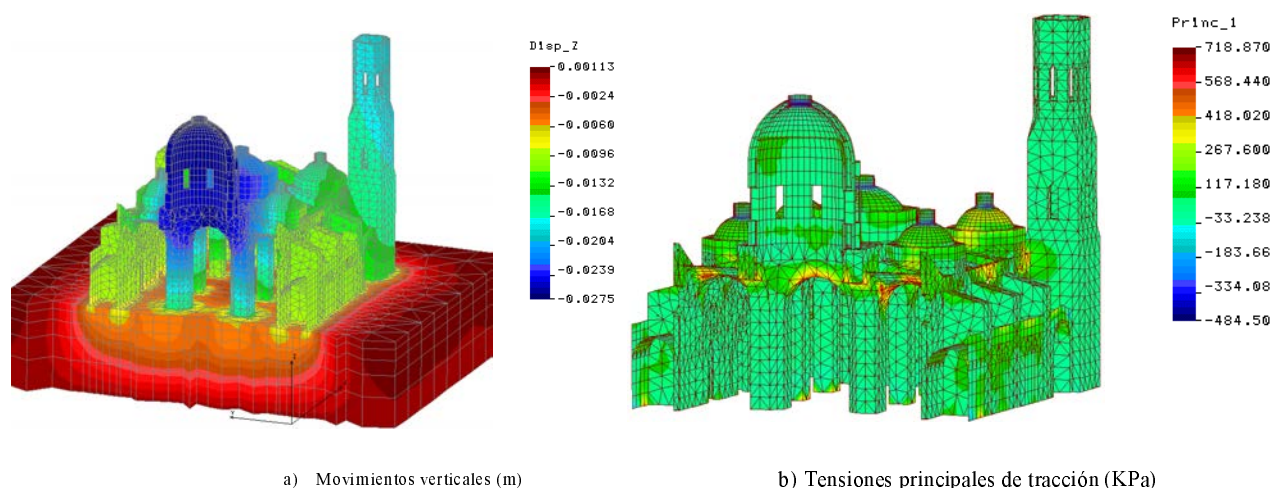


Figura 9. Resultados del modelo de 1930

La causa principal de estos elevados valores es el excesivo peso y dimensiones de la cúpula central. La distribución de tracciones concuerda con la descripción de los daños del templo en esa época, siendo máximas en las bóvedas y arcos del entorno de la cúpula central. Sin embargo, no se aprecian excesivas tracciones en los tambores de las cúpulas elípticas, estando recogido en los informes de la época el hecho de que el tambor elíptico de la cúpula del coro era una de las zonas más fisuradas.

En la Figura 10 aparecen los resultados obtenidos en un análisis no lineal con un modelo de material del tipo 1, suponiendo un límite de rotura a tracción de 150 KPa., una tensión residual del 10 % del valor anterior, un módulo de descarga del 10 % del valor lineal y un módulo de retención a cortante de 0,01. Se observa cómo las roturas a tracción se inician en los arcos y progresan fundamentalmente por los tambores de las cúpulas elípticas, debido al giro que les impone el excesivo peso de la cúpula y el tambor central.

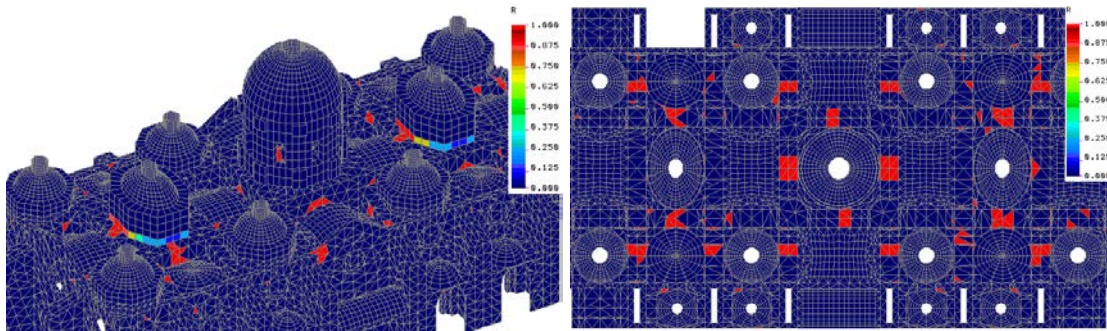


Figura 10. Porcentaje de puntos de integración en rotura a tracción en elementos tridimensionales

Respecto a la fisura posteriormente reparada de la cúpula Regina Martirum, mencionada en la introducción, no aparece registrada en los resultados anteriores. Tras trabajar con varias hipótesis de movimientos diferenciales se ha planteado como posible origen una distribución de propiedades del terreno como la representada en la Figura 11, con aproximadamente 1/6 de la base del templo sobre un terreno de peor calidad. En estas condiciones se produce una distribución de tracciones con máximos de hasta 1300 KPa en el tambor de la cúpula coincidentes en orientación y posición con la fisura real.

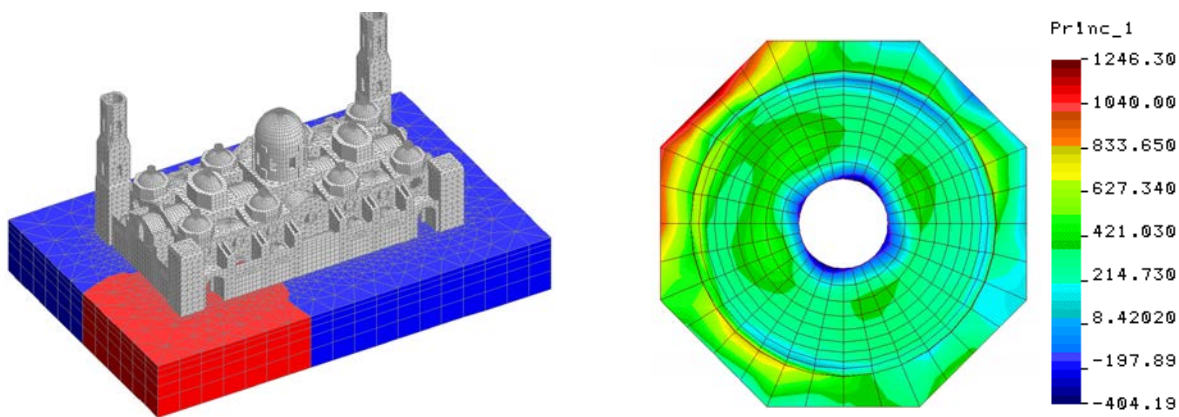


Figura 11. Modelo con dos terrenos y tracciones principales en la cúpula Regina Martirum (KPa)

Modelo del estado actual

La aplicación secuencial de las distintas obras de reparación descritas previamente ha permitido comprobar su efecto relativo, siendo éste especialmente significativo en el caso de la mejora de la cimentación y el forro metálico de los arcos y pilastras de la estructura.

Considerando un modelo con material lineal y con todas las obras de rehabilitación aplicadas, las tensiones principales máximas en la fábrica de ladrillo se reducen a 102 KPa de tracción en la clave de los arcos y a 1123 KPa de compresión en la base de los pilares centrales. Localmente se alcanzan valores superiores de tracción en las uniones de las torres con el cuerpo central, con un valor máximo de 443 KPa.

En la cúpula Regina Martirum las tracciones principales máximas de membrana aparecen en la Figura 12. Añadiendo la flexión de la lámina los valores, se incrementan hasta 281 KPa en tracción y 911 KPa en compresión, situándose los máximos en la zona superior de la cúpula junto a la unión con el chapitel.

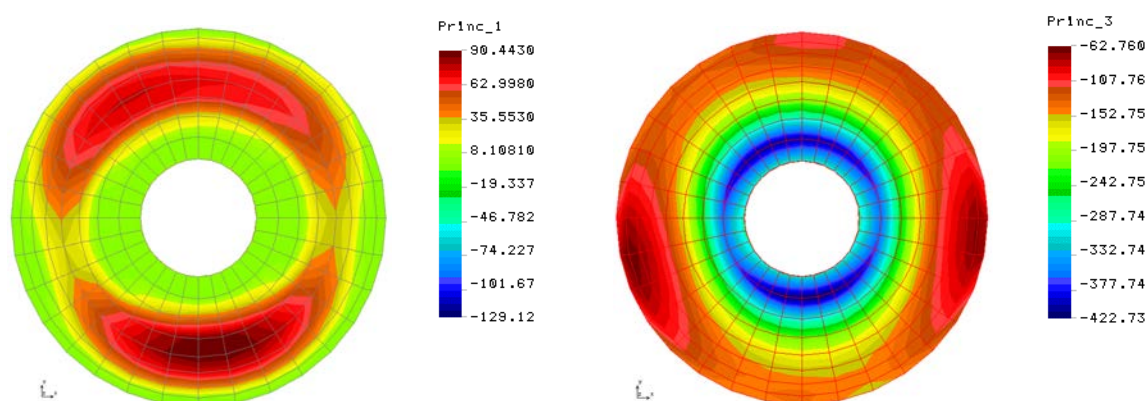


Figura 12. Tracciones (izda) y compresiones (dcha) de membrana en la cúpula Regina Martirum (KPa)

Considerando un material no lineal se ha realizado un análisis local de la cúpula Regina Martirum modelizada mediante elementos sólidos. Para ello se han impuesto como condiciones de contorno en la cúpula los movimientos de su base obtenidos en el análisis lineal de la estructura completa, aplicando conjuntamente las cargas gravitatorias y los pesos externos que actúan sobre la cúpula y utilizando un material con rotura a tracción combinada con un modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb lineal en compresión. Este método introduce errores en el análisis de la cúpula, pero pensamos que permite obtener una primera aproximación no lineal de su comportamiento y de la carga de agotamiento.

En lugar de incrementar por encima de su valor máximo las cargas aplicadas se ha optado por variar los parámetros del material hasta obtener el colapso cerca del límite de las cargas aplicadas. Considerando como variable la tensión de fisuración del material y tomando unos valores razonables y usuales para el resto de parámetros, el colapso para las cargas existentes se produce para una tensión de fisuración de 75 KPa, inferior pero próximo al valor más habitual de 100 KPa.

Las propiedades del material utilizadas han sido: $E = 4,5 \text{ e6 KPa}$, $\nu = 0,1$, $\gamma = 17,66 \text{ KN/m}^3$, $E_s = E/8$, $\varepsilon_{ap} = 0,004$, $\sigma_{cr} = 75 \text{ KPa}$, retención a cortante de la fisura = 0,01, cohesión $c = 200 \text{ KPa}$ y ángulo de fricción interna = 40° .

En la Figura 13 aparecen las deformaciones de fisuración equivalentes y la variación de la tensión principal de tracción en el nudo donde se inicia ésta. Las cargas se aplican linealmente en 200 pasos, produciéndose el colapso en el paso 197. En la Figura 14 aparecen las plastificaciones elementales equivalentes, obtenidas en el paso previo al colapso.

El proceso de fisuración se inicia en el paso 100 y posteriormente la plastificación en el paso 140, concentrándose en la zona superior de aplicación de las cargas procedentes del chapitel. Todo ello considerando una tensión conservadora de inicio de fisuración de 75 KPa.

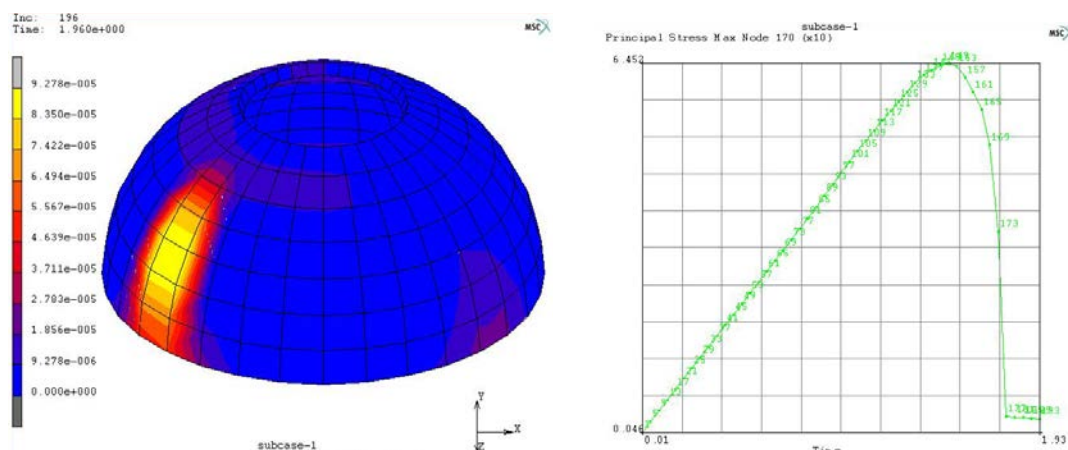


Figura 13. Deformación de fisuración equivalente en la cúpula Regina Martirum y variación de la tensión principal máxima en la zona principal de fisuración

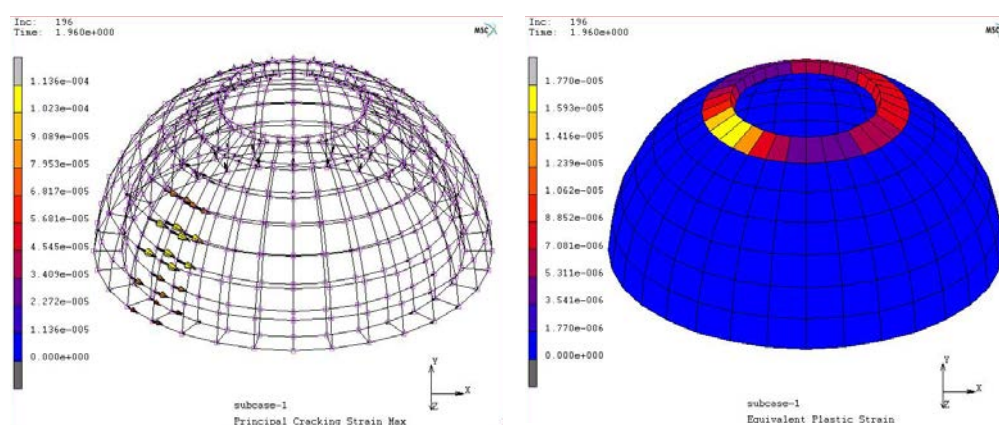


Figura 14. Valor vectorial de la deformación de fisuración principal (izda) y deformación plastica equivalente elemental (dcha) de la cúpula Regina Martirum

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El estudio realizado ha permitido reproducir las patologías previas de la Basílica y comprobar lo acertado de las obras de restauración y refuerzo desarrolladas por el arquitecto D. Teodoro Ríos durante los años 40 del pasado siglo.

De los modelos del estado actual del templo se deduce que la situación actual estructural de la cúpula Regina Martirum parece satisfactoria y no existen riesgos de patologías considerando que la resistencia a tracción de la fábrica de ladrillo es superior a 100 KPa. En el resto del templo la situación es similar, aunque en las torres de la fachada sur las compresiones existentes debido a su gran altura junto al deterioro ambiental de la fábrica de ladrillo, hacen necesario un control de su comportamiento.

La utilización de modelos con material lineal, a pesar de tratarse de un material como la fábrica de ladrillo, como un paso previo a posibles análisis considerando modelos no lineales más realistas permite obtener aproximaciones que facilitan la comprensión del comportamiento real de la estructura con un coste y una complejidad muy inferiores a los del caso no lineal.

Los resultados obtenidos se basan en la asunción de unos valores de los parámetros mecánicos de los materiales obtenidos de la extensa bibliografía existente. Con el fin de determinar el grado de seguridad real y lo acertado de las simulaciones es necesario realizar una campaña de ensayos que permitan determinar experimentalmente las propiedades de la fábrica y su distribución espacial en el templo.

De forma similar sería conveniente instrumentar el templo y en especial la cúpula Regina Martirum para determinar las cargas térmicas y su variación.

Respecto a las modelizaciones realizadas se plantea el desarrollo futuro de las siguientes mejoras: consideración de la ortotropía de la fábrica en los modelos lineales y no lineales; obtención de una matriz de rigidez reducida en el contorno de la base de la cúpula Regina Martirum que sustituya a los desplazamientos impuestos en el análisis no lineal de la cúpula; y la aplicación del modelo no lineal del material con fractura distribuida a tracción y plasticidad al modelo completo del templo.

REFERENCIAS

- 1 T. Ríos Usón y T. Ríos Solá, "El Pilar de Zaragoza", CAI (ed.), pp. 185–212, (1983).
- 2 L.E. Romera, S. Hernández y otros, "Modelos geométrico y estructural de la Basílica del Pilar de Zaragoza", *Métodos Numéricos en Ingeniería V*, SEMNI, (2002).
- 3 S. Hernández y L.E. Romera, *Computer Modelling of the Basílica of Pilar in Zaragoza (Spain)*, C.A. Brebbia ed. Structural Studies, "Repairs and maintenance of heritage architecture VIII", (2003).
- 4 COSMOS/M v.2.8, "Finite element analysis system: I) User guide, IV) Advanced modules", Structural Research & Analysis Corporation, (2003).
- 5 L.E. Romera, S. Hernández y A. Mosquera, "Análisis estático y dinámico de estructuras con el programa COSMOS/M v.2.5", Tórculo Ediciones, (2002).
- 6 MSC.MARC 2003, Vol. A, "Theory and user Information", (2003).
- 7 C. Molins, "Characterization of the mechanical behaviour of masonry", P. Roca, J.L. González, A.R. Marí y E. Oñate (eds.), "*Structural analysis of historical constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques*", CIMNE, pp. 86-122, (1997).
- 8 P.B. Lourenço, "Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry", P. Roca, J.L. González, E. Oñate y P.B. Lourenço (eds.), "*Structural analysis of historical constructions II. Possibilities of numerical and experimental techniques*", CIMNE, pp. 57–92, (1998).
- 9 M.A. Crisfield, "*Non-linear finite element analysis of solids and structures. Advanced topics*", John Wiley & Sons, Vol. II, (1997).
- 10 Structural repair and maintenance of historical buildings, C.A. Brebbia (ed.), "*Computational Mechanics Publications*", (1989).
- 11 "*Computational modelling of masonry, brickwork and blockwork structures*", J.W. Bull (ed.), Saxe-Coburg Publications, (2001).